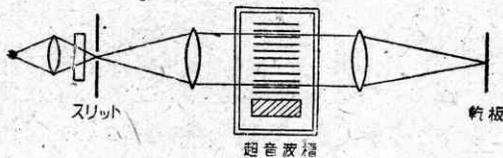


超 音 波 の 映 像

鳥 飼 安 生 ・ 根 岸 勝 雄

はしがき

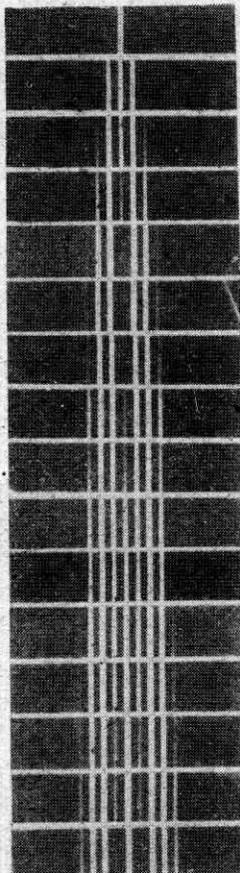
音波が媒質中を傳わると、媒質中に密の部分や疎の部分が出て、その媒質の屈折率が變化する。しかし、光の透過度については、音波のある部分もない部分も變らないので、媒質を直接眼で見ても音波の存在をみとめることはできないが、適當な光學系を使うことによつて、音波の存在、進路等を眼に見えるようにすることができる。屈折率だけが變化しているような媒質があるとき、



第 1 圖 超音波による光の廻折装置

その變化の模様を知るものとして昔から有名なものに、Toepler¹⁾ のシュリーレン法があつて、火花による球面音波の寫眞などがとられているが、特に超音波の場合には、以下述べるように超音波特有の方法があつて、その映像を得ることができる。

1932 年、Debye & Sears²⁾ および Lucas & Biquard³⁾ はたがいに獨立に超音波による光の廻折現象を報告している。媒質中に超音波があるとき、それと直角の方向に光を當てると、超音波はちょうど光學格子と同じような作用をして、光は廻折作用を受けるのである。この場合の格子常数は、音波の波長と一致する。實驗としては第 1 圖のような装置を使う。スリットを出た光がレンズで平行となり、超音波槽を通過すると廻折



第 2 圖 超音波による光の廻折像 (能本氏撮影)

超音波も周波数が 1Mc 以上になると、普通の音波よりもむしろ光に近いような性質を表わしてくる。また同時に適當な光學系によつてその映像を寫しとることができるようになる。この稿ではその映像法を詳しく述べ、また實際に撮られた、反射、屈折、廻折の模様などいくつかの例を示した。波動というものに対する認識を新たにしていただければ幸いてある。

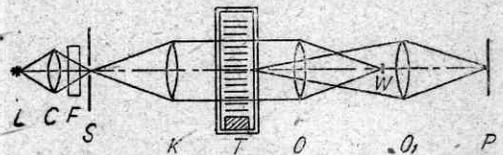
されて、次のレンズの焦點面上に廻折像がならぶ。廻折寫眞の 1 例を第 2 圖にかかげる。これは小林理研の能本氏⁴⁾ が進行超音波につき撮影のもので、上から下に音の強さが順次に強くなつてゐる。

この現象を利用して、いくつかの超音波映像法が考えられたが、中でも著名なのは、Bär & Meyer⁵⁾ による方法、Hiedemann⁶⁾ の二次的干涉の方法、Hiedemann⁷⁾ の音波の強度映像法である。

筆者等は最近この最後の方法による超音波映像についての一連の實驗を行つてきたが、後で示すように超音波の物體面での反射、透過、廻折の模様などが美しく映し出され、光の場合と全く同じような様相を見ることができ、また複雑な廻折の問題など解く上に有力な一方法を提供さえるのである。なお筆者等は研究を一步進めて、この映像の感度を上昇するのに位相差法を應用して、理論的に検討し、それを實驗的に確かめ得た。

映像の装置

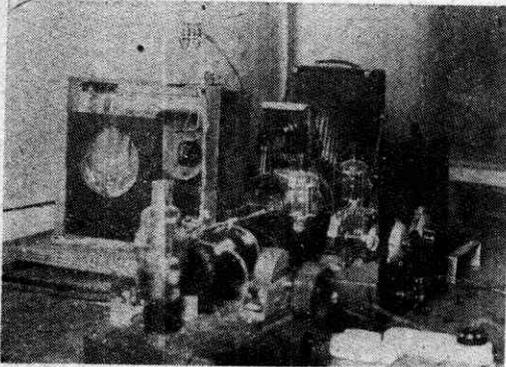
装置の概略は第 3 圖に示す通りである。光源 L は低壓水銀ランプで、コンデンサーレンズ C で幅 0.3 mm のスリット S 上に光が集められる。フィルター F により單色光 564 m μ だけが使われている。スリットを出た光はコリメーターレンズ K で平行となり、超音波槽 T を通つてから、對物レンズ O によりその後側焦點面上にスリット像が生じ、さらに映像レンズ O_1 によつて、超音波槽の像が乾板または磨硝子 P 上のできるようにする。



第 3 圖 超音波映像装置

超音波槽 T は、長さ 25 cm、高さ 20 cm の 2 枚の平面硝子板を窓に持つた、幅 5 cm の水槽で、その片端に水晶振動子を用いた音源をおく。音源の周波数は 2Mc (メガサイクル) で、水中の音速は 1.5×10^5 cm/sec であ

るから、水中の波長は 0.75 mm となる。装置の一部の写真を第4圖にかかげる。なお装置の詳細については、本誌上での白鳥君⁸⁾の報告を参照されたい。



第4圖 実験装置の一部

超音波槽を通つた光は、前項で述べた通り廻折作用を受けて、レンズOの後側焦点面上には第2圖のような廻折像がならぶ。そこでこの中零次の像だけを細い針金Wで遮蔽すると、槽中で超音波のない部分を通つた光は全部さえぎられるが、超音波のある部分を通過した光の一部はさえぎられることなく乾板P上に達するので、P上に超音波の映像が生じ、しかも超音波の強さが強ければ映像も濃く出てくるのである。このようにして第5圖以下の映像の写真を撮ることが出来る。

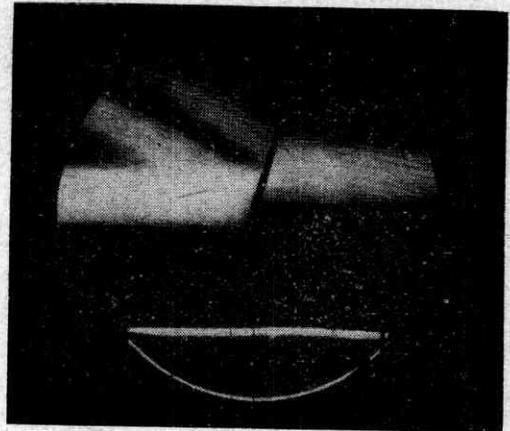
これらの写真から、媒質中での超音波の傳播状態がよくわかつて、色々興味をわくのであるが、また光學系のように、波動のくる方向に眞向つて観察できたら便利ではないかとだれでも気付くところであろう。超音波系でのこのような観察についてもいろいろ面白い方法があるのだが、これについての記述は他の機会にゆずりたい。

超音波の映像

さて第5圖(a)、(b)はガラス板に斜に超音波が入射したときの様子を示す。第5圖(a)は反射だけの場合だが、第5圖(b)では、ガラス板前面での反射の他に、1度屈折して入つたものが、後面で反射して前面から元

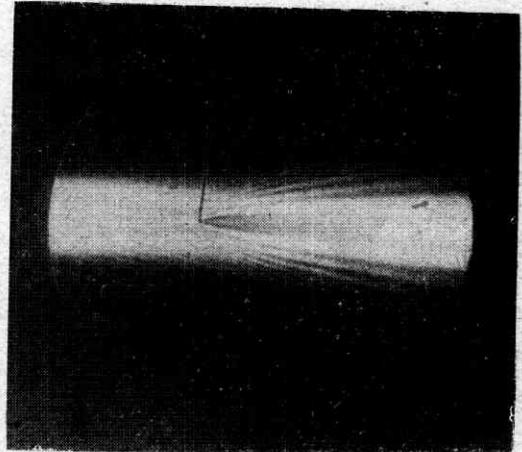


第5圖(a) ガラス板(1.5 mm厚)による反射

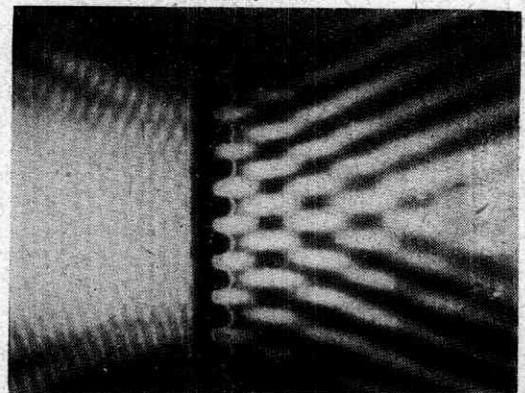


第5圖(b) ガラス板(2 mm厚)における反射と透過

もどつてきたような反射波も見られるし、またこの場合には透過した波もある。このように平板に音波がやつてきたとき、その厚さが薄ければ必ず透過しやすいとはかぎらないので、音の透過率はやつてきた波の波長、入射角、板の弾性的性質、厚さ等と複雑な関係を持つのである。



第6圖 銅線(直徑 1mm)による廻折

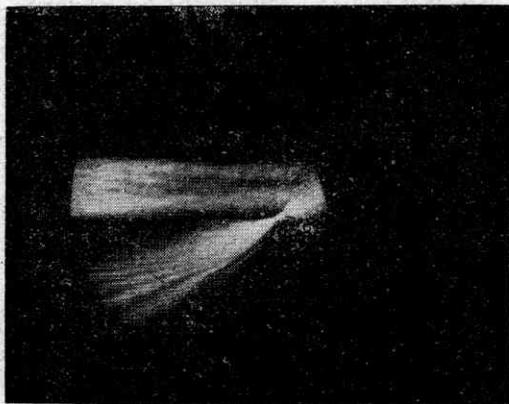


第7圖 直徑 1mm の銅線を 2mm 間隔にならべた格子による廻折

第6圖は音波面に平行におかれた1本の針金による廻折を示すもので、やつてきた平面波と、廻折された球面波に近い波とが干渉して、拋物線近似の干渉圖をえがいている。

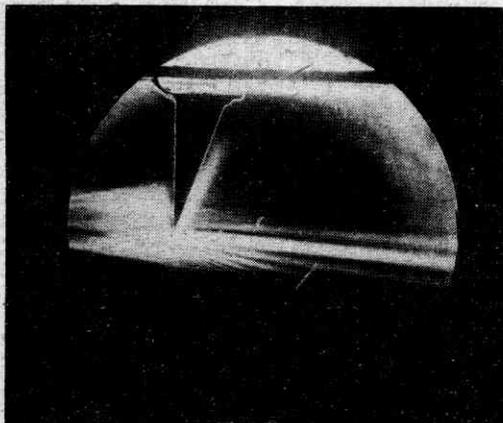
第7圖は多數の針金を平行に等間隔にならべた格子による廻折の模様（フレネルの廻折）を示している。格子の後側には明暗の縞が週期的にならんで基盤目状をなしており、また前では反射波と入射波との干渉像が見られるが、よく見ると波面の波打つたところと平らなところが周期的に現れている。これらの點については、能本氏⁹⁾が詳しい説明をされている。

第8圖は球面鏡による反射で、収斂の有様がよく出ている。



第8圖 球面鏡による反射

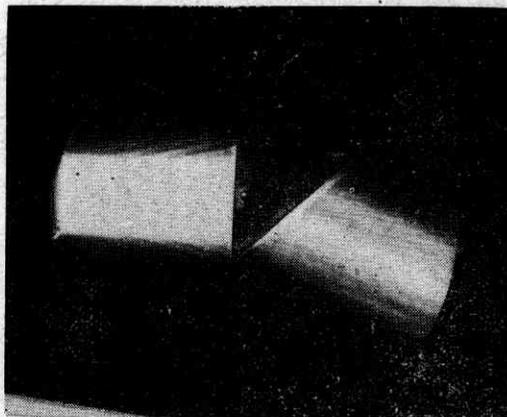
第9圖は楔の頂角附近での、廻折で光の場合とちがつて、音のように波長の長い波動については、はつきりした影ができにくいことがよくわかる。



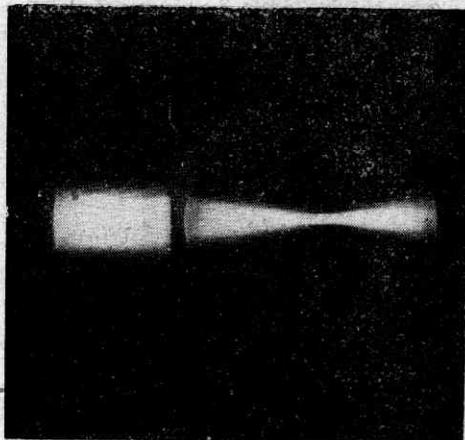
第9圖 楔形エポナイトの頂角附近での廻折

第10圖は有機ガラスのプリズムによる屈折を示す。屈折の方向が光の場合と逆になっているのは、有機ガラス中の音速が水中の音速より速いため、音波に対する屈折率では水の方が大きくなつてくることを現している。このことは次の第11圖のレンズの場合にもはつきり出

てくる。すなわち、有機ガラスでレンズを作つたとき、音波を収斂させるのは、凸レンズではなくて凹レンズである。



第10圖 プリズム（有機ガラス）による屈折



第11圖 凹レンズ（有機ガラス）による収斂

固体中の音速測定

前項最後にかかげたつづきの写真は、固体試料の音速測定の方法を興えるのであつて、プリズムのとき1方の面に直角入射した音波が、頂角 θ のプリズムにより δ の偏角で屈折されたとき、水中の音速を V_0 、プリズム中の音速を V_d とすると、

$$V_d / \sin \theta = V_0 / \sin (\theta - \delta)$$

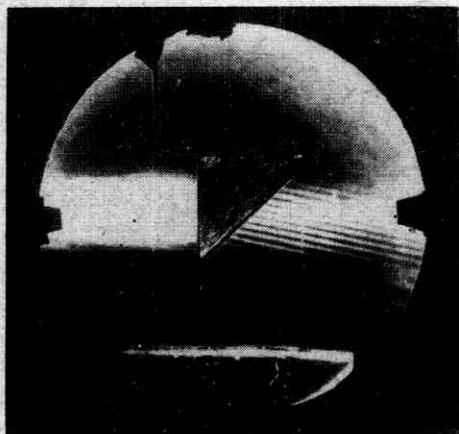
また第11圖のような平凹レンズの場合、凹面の曲率半径を R とし、レンズの焦点距離を f 、レンズ中の音速を V_d とすると、

$$f = \frac{R}{1 - V_0 / V_d}$$

それぞれの式で、 V_d 以外の量が求められれば、 V_d が計算されるのである。ただしどちらの場合にも、圖のように入射面は入射波に垂直な平面でなければならない。それは、斜に入射すると、固体中では縦波の他に横波が生ずるので、話をもつと複雑になつてくるからである。上

にあげた V_d は縦波の音速を表している。

上の二つの音速測定法はあまり精度がよくないが、最近 Willard¹⁰⁾ はプリズムを用いるものと精度のよい方法を発表している。それはプリズムを装置する場合、入射音波全部をさえぎるようなしなないで、その幅の半分ぐらいまでさえぎるようしておくのである。すると音波はプリズムで2つに分けられ、1方はプリズムを通らないで真直ぐに進み、他方はプリズムによつて屈折されて斜に出てくる。そこでこの出たところで観察すると、このたがい斜の角をなしている2つの音波は、それ等を直角に貫通する光に対しては、その2つの波が同じ場所で交つて存在しているのと同様の効果を興えるので、音波の映像面には、ちょうど音波が交つて干渉しているかのように、両波の進む方向を2等分する方向に平行な縞が生じてくる。第12圖に1例を示す。この縞の間隔を測定



第12圖 Willardの方法有機(ガラス)
 $V_d=2760$ m/sec

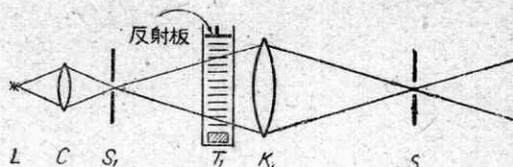
すると簡単な計算によりプリズム中の音速が求められる。結果だけを示すと次の通りである。

$$1/(N \cdot d \cdot \sin \theta) = 1/V_0 - 1/V_d$$

ただし、 N は音波の振動数、 d は縞の間隔をプリズムの斜面に沿つて測つた値、 θ はプリズムの頂角、 V_0 は水中の音速、 V_d は試料中の音速である。この場合、 d 測定精度が割合良いため、音速も精度よく求められる。

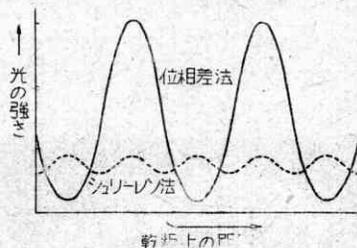
位相差法の應用

最近筆者等は、弱い超音波の映像に當つての感度の上昇法として、位相差顕微鏡の理論と方法¹¹⁾とをそのまま使つて見た。この位相差法を使うには、まず高周波ストロボスコープにより超音波の波面の映像を得る必要がある。われわれの場合超音波の周波数は $2Mc$ であるので、ストロボの點滅の周波数も $2Mc$ でなければならぬが、これにはやはりまた超音波が使われ簡単に得ることができる。¹²⁾ 装置としては第3圖のスリット S から前を第13圖のように作りかえればよい。すなわち新し

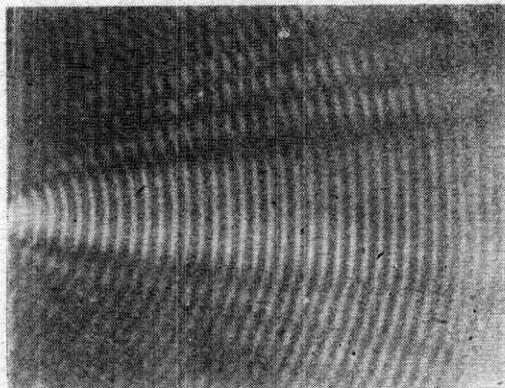


第13圖 超音波ストロボ装置

くスリット S_1 、レンズ K_1 、窓のある超音波水槽 T_1 を設けて、槽中には $1Mc$ の水晶振動子を入れ、また反対側に反射板をおいて、 $1Mc$ の定常超音波を作らせる。スリット S から後は第3圖と全く同じようにする。レンズ K_1 によりスリット S_1 の像を S 上に結ばせると、すでに述べた通り T_1 中の超音波により S 附近には廻折像がならぶが、その中零次の像だけをスリット S で取り出すと、定常超音波の性質から、スリット S の光の強さは $2Mc$ の周波数で變化する。すなわち周波数 $2Mc$ の高周波ストロボスコープが得られるわけである。このような装置で、進行超音波の波面の映像が得られるが、この場合第3圖の零次の廻折像のさえぎり方を完全にしてしまわないで、零次の像に適當な吸収と位相變化を興えることにより、すなわち適當な位相差板で蔽うことにより、映像の visibility (可視度) を増大させることができる。位相差顕微鏡の理論に則り、ある強さの超音波に対して、適當な値の位相差板を用いた場合(位相差法)と、完全にさえぎつた場合(シュリーレン法)との計算をやつた結果、第14圖のような曲線が得られた。明かに位

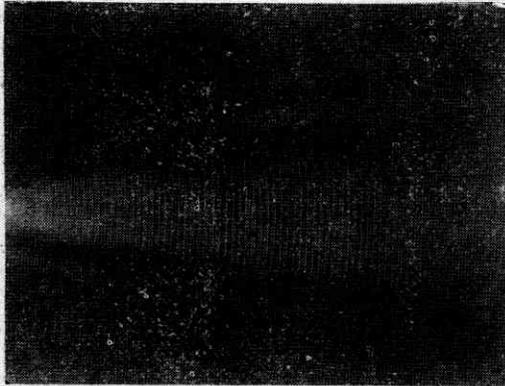


第14圖 高周波ストロボによる
進行超音波の映像曲線



第15圖 (a) スリットを通つた超音波
のストロボ寫眞(位相差法)

相差法の方がシュリーレン法にまさっている。実際にすでに述べた装置を作つて映像を撮つて見ると、第 15 圖 (a)、第 15 圖 (b) のようになって、理論の結果を裏書きしていることがわかる。位相差板としては千代田光學研究部で特製のものをを用いた。



第 15 圖 (b) スリットを通つた超音波のストロボ寫眞 (シュリーレン法)

むすび

最近、超音波探傷器や超音波魚群探知器が實際面で盛んに用いられていると共に、物體による音波の散亂や廻折の問題が大きな研究題目となつてゐるが、この問題は

理論的にも非常に複雑であり、實驗もそう容易ではない。この稿に述べた音波の映像法は、さういつた問題を直接映像自身で解くことができるわけで、非常に有力な手段を與えるものと思われる。その他一般に、波動の問題、媒質中の音速の測定等々色々利用價値はあるであろう。

またこの稿で述べた位相差法の應用は、超音波映像に役立つと共に、位相差顯微鏡理論の一つの實驗的方法を與え得るものとして注目される。

× × × × - × ×

終りにのぞみ、特に装置についていろいろ御援助いただいた當研究所の久保田教授、廻折寫眞を貸與下さつた小林理研の能本乙彦氏、ならびに位相差板を貸與下さつた千代田光學の及川昇氏に厚く感謝の意をささげる。

(26. 12. 22)

文 獻

- 1) M. Toepler: Ann. Phys., Lpz. IV. Folge, 27 (1908), 1083.
- 2) P. Debye and F. W. Sears: Proc. Nat. Acad. Sci. 18 (1932), 409.
- 3) R. Lucas et P. Biquard: C. R. 195 (1932), 121.
- 4) 能本: 科學 13 (昭 18), 195.
- 5) R. Bär und E. Meyer: Hely. Phys. Acta 6 (1933), 242.
- 6) Ch. Bâchem, E. Hiedemann und H. R. Asbach: Z. Phys. 87 (1934), 734.
- 7) E. Hiedemann und K. Hoesch: Z. Phys. 104 (1937), 197
- 8) 白鳥: 生産研究 3 (1951), 93.
- 9) O. Nomoto: J. Phys. Soc. Jap. 2(1947), 41.
- 10) G. W. Willard: J. Acous. Soc. Amer. 23 (1951), 83.
- 11) 久保田, 及川: 應用物理 18 (1949), 163.
- 12) H. E. R. Becker: Phys. Z. 37 (1936), 414.

次 號 豫 告 (4 月 増 大 號)

“新しい計算機” 特集

特 集

計算機の研究.....	山 内 恭 彦
計算機の理論的構造.....	後 藤 以 紀
三ツの微分解析機	
機械的 微分解析機.....	三 井 田 純 一
電氣的 “ ”.....	伊 藤 努
電子管的 “ ”.....	野 村 民 也
交流計算盤	
電氣試験所の交流計算盤.....	山 田 太 三 郎
アメリカの “ ”.....	豊 田 正 敏
統計機械	
電氣統計機.....	佐 藤 亮 策
I.B.M.....	今 村 茂 雄
海外通信	
國際計數センター設置の條約會議.....	山 下 英 男
電子計算機.....	渡 邊 勝
その他 計算機性能一覽表, 海外研究情報, 速報等	

生産技術研究所報告 第 2 卷 第 4 號 豫 告

亘理 厚著 英文「回轉軸の運動に関する研究」

“Research on the Motion of Rotating Shafts”

内 容

・回轉軸の運動はその回轉運動とふれ回り運動とを連立して考えるとき非線型の問題になる。その一般的な運動を、軸の曲げ剛さの一樣な場合、曲げ剛さの一樣でない場合、軸受部の剛さの一樣でない場合について解析し、つぎにジャイロ作用の影響、回轉軸の自勵的なふれ回り運動、吸振器としての軸受部の影響を解析している。さらに軸の支持條件を單純化した軸および數種の紡績用スピンドルについて實驗的解析を行い、理論との比較および回轉軸とくに紡績用スピンドルの設計について論じている。

若干増刷分がありますから頒布希望の方は當所業務課まで御申出下さい。(代金は實費申受ます)